

目次

- 中国城市碳排放强度的时空演变、动态跃迁及收敛趋势 杨清可, 王磊, 朱高立, 李颖, 范业婷, 王雅竹 (1869)
- 交通运输业碳排放效率时空演变及趋势预测 郑琰, 蒋雪梅, 肖玉杰 (1879)
- 基于扩展STIRPAT模型LMDI分解的碳排放脱钩因素 张江艳 (1888)
- 基于LEAP模型的工业园区碳达峰路径:以南京某国家级开发区为例 李慧鹏, 李荔, 殷茵, 何文大, 宿杰, 赵秋月 (1898)
- 高校碳排放核算与分析:以北京A高校为例 曹睿, 封莉, 张立秋 (1907)
- 北京市制造业减排降碳协同效应分析和驱动因素 俞珊, 韩玉花, 牟洁, 张双, 张增杰 (1917)
- 碳排放权交易价格与全要素生产率:来自中国的证据 吴雪萍 (1926)
- 中国城市PM_{2.5}和PM₁₀时空分布特征和影响因素分析 李江苏, 段良苏, 张天娇 (1938)
- 2017~2021年苏皖鲁豫交界区域PM_{2.5}和O₃时空变化特征及影响因素 陈伟, 徐学哲, 刘文清 (1950)
- 疫情管控期西安PM_{2.5}和O₃污染特征及成因分析 原晓红, 张强, 李琦, 谢文豪, 刘跃廷, 樊亭亭, 姜旭朋 (1963)
- 苏南五市秋冬季PM_{2.5}化学组成特征和空间差异 冯蔚, 丁峰, 尚玥, 谢鸣捷 (1975)
- 湖北咸宁细颗粒物PM_{2.5}来源 罗怡, 朱宽广, 陈璞琰, 田军, 谢旻, 战杨志豪, 赵润琪 (1983)
- 邢台氨减排对京津冀PM_{2.5}改善的溢出效益 边泽君, 闻超玉, 郎建奎, 范晓茜, 夏祥晨, 周颖 (1994)
- 聊城市冬季PM_{2.5}载带金属元素污染特征、风险评价及来源分析 张敬巧, 朱瑶, 曹婷, 燕丽, 王淑兰, 刘铮 (2003)
- 高原城市拉萨典型VOCs排放源成分谱特征 郭淑政, 叶春翔, 林伟立, 陈熠, 曾立民, 尹晴晴, 刘雪莉 (2011)
- 北京市工业园区VOCs污染特征及健康风险评估案例:高新技术产业的环境影响 王洁, 姚震, 王敏燕, 陈速敏, 龙腾, 王海林, 李红, 郭秀锐, 郝江虹, 聂磊 (2019)
- 高温极端天气影响下的成都平原一次典型臭氧污染过程分析 雷丽娟, 张懿, 罗伊娜, 张潇, 冯森 (2028)
- 水环境中抗病毒药物的存在、行为与风险 葛林科, 李璇艳, 曹胜凯, 郑金帅, 张蓬, 朱超, 马宏瑞 (2039)
- 黄河小浪底水库地表水中重金属的时空变化与概率健康风险 王亮, 邓雪娇, 王潇磊, 李明, 刘奕尧, 姜亚敏, 涂响, 张坤锋 (2054)
- 藏东多曲河流域锑富集水化学特征及控制因素 李敬杰, 连晟, 王明国, 张智印, 张涛 (2067)
- 西北内陆区降水稳定同位素时空分布特征及其水汽来源 张炎炎, 辛存林, 郭小燕, 张博, 陈宁, 史延飞 (2080)
- 基于水化学和氢氧同位素的泰安城区岩溶地下水补给来源及演化过程 孟令华 (2096)
- 丹江流域山区地表水-地下水水化学特征及其影响因素 张子燕, 伏永朋, 王宁涛, 谭建民, 刘亚磊 (2107)
- 金塔盆地鸳鸯池灌区地下水水化学特征及控制因素 王晓燕, 韩双宝, 张梦南, 尹德超, 吴玺, 安永会 (2118)
- 德阳市平原区浅层地下水水化学特征与健康风险评价 刘楠, 陈盟, 高东东, 吴勇, 王橹橹 (2129)
- 典型城市河网沉积物微塑料时空分布特征 许万璐, 范一凡, 钱新 (2142)
- 抚仙湖流域尺度氮排放清单构建及关键源解析 王延杰, 梁启斌, 王艳霞, 侯磊, 陈奇伯, 王伟, 李晓琳, 高俊淑 (2150)
- 过氧化钙/海泡石海藻酸钠缓释凝胶复合材料的制备及其对内源磷的控制性能 曲思彤, 单苏洁, 王崇铭, 吴玲予, 李大鹏, 黄勇 (2160)
- 矿物超细颗粒的形成机制、结构特征及其环境行为和效应 刘振海, 张展华, 袁语欣, 朱盼盼, 陈威, 张勇 (2171)
- 生物炭固定化菌复合材料在环境修复中的应用研究进展 孙淑玉, 黄梦鑫, 孔强, 张焕新, 刘继伟 (2185)
- 微塑料对沸石吸附水体氨氮的影响及其机制 练建军, 谢诗婷, 吴培, 孟冠华, 陈波 (2195)
- 紫外老化作用对纳米生物炭吸附环丙沙星的影响机制 马锋锋, 薛之一, 赵保卫 (2203)
- 土地利用影响下永定河流域浮游植物群落与环境因子响应 郭善嵩, 胡恩, 丁一桐, 张嘉渭, 孙长顺, 卢悦, 潘保柱 (2211)
- 鄱阳湖湿地细菌群落多样性和可培养细菌功能基因丰度 喻江, 王淳, 龙永, 刘贵花, 李春杰, 范国权, 于镇华 (2223)
- 典农河沉积物细菌群落结构特征及其与重金属的关系 刘双羽, 蒙俊杰, 邱小琮, 周瑞娟, 李霖 (2233)
- 污水处理厂尾水排放对受纳河流细菌和真菌微生物群落的影响 郭有顺, 余仲, 郝文彬, 孟凡刚 (2246)
- 宏基因组学分析深度处理阶段污水中细菌的赋存特征及其功能 胡健双, 王燕, 周政, 汪雅琴, 王秉政, 李激 (2259)
- 大别山区生境质量时空特征及自然-人为因素驱动机制 郑亚平, 张俊华, 田惠文, 朱航成, 刘舒, 丁亚鹏 (2268)
- 基于连续小波变换、SHAP和XGBoost的土壤有机质含量高光谱反演 叶森, 朱琳, 刘旭东, 黄勇, 陈蓓蓓, 李欢 (2280)
- 秸秆还田、覆膜和施氮对旱地麦田土壤质量的影响 叶子壮, 王松燕, 陆潇, 史多鹏, 吕慎强, 李嘉, 杨泽宇, 王林权 (2292)
- 长期施用有机肥对土壤微塑料赋存及迁移特征的影响 王长远, 马啸驰, 郭德杰, 刘新红, 马艳, 罗佳 (2304)
- 土壤盐分变化对N₂O排放影响:基于Meta分析 黄艺华, 余冬立, 史祯琦, 胡磊, 潘永春 (2313)
- 基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测 郑慧玲, 郑辉峰 (2321)
- 基于InVEST模型的伏牛山地区生态系统碳储量时空变化模拟 张哲, 时振钦, 朱文博, 孙梓欣, 赵体侠, 邓文萍, 刘志强 (2332)
- 防护林建设过程中土壤微生物养分限制与有机碳组分之间的关系 徐凤璟, 黄懿梅, 黄倩, 申继凯 (2342)
- 长期秸秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力 赵宇航, 殷浩凯, 胡雪纯, 解文艳, 刘志平, 周怀平, 杨振兴 (2353)
- 冬绿肥覆盖对土壤团聚体及有机碳和AMF多样性的影响 鲁泽让, 陈佳钰, 李智贤, 李永梅, 罗志章, 杨锐, 田明洋, 赵吉霞, 范茂攀 (2363)
- 辽河流域氮素时空分布及其对土地利用和降雨的响应 周波, 李晓光, 童思陈, 吕旭波, 郭朝臣, 雷坤 (2373)
- 高强度农业种植区不同景观池塘氧化亚氮排放特征 张欣悦, 肖启涛, 谢晖, 刘臻婧, 邱银国, 罗菊花, 徐向华, 段洪涛 (2385)
- 生物炭与不同类型氮肥配施对菜地土壤反硝化细菌群落的影响 柳晓婉, 刘杏认, 高尚洁, 李贵春 (2394)
- 太岳山不同林龄人工油松林土壤微生物特征 马义淑, 曹亚鑫, 牛敏, 张明昱, 程曼, 文永莉 (2406)
- 基于稀疏样点的土壤重金属含量模拟方法 张佳琦, 潘瑜春, 高世臣, 赵亚楠, 景胜强, 周艳兵, 邹允兵 (2417)
- 基于特定源-风险评估模型的兰州黄河风情线绿地土壤重金属污染优先控制源分析 李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 陈伟, 脱新颖 (2428)
- 西南不同类型紫色土pH变化、重金属累积与潜在生态风险评估 张海琳, 张雨, 王顶, 谢军, 张跃强, 张宇亭, 王洁, 石孝均 (2440)
- 重庆某铁矿区周边耕地土壤重金属污染评价及来源解析 廖泽源, 李杰芹, 沈智杰, 李彩霞, 罗程钟, 梅楠, 张成, 王定勇 (2450)
- 金属矿区周边农田土壤与农作物重金属健康风险评估 魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思 (2461)
- 赤泥基纳米零价铁对多金属污染土壤修复效果 刘龙宇, 杨世利, 赵黄诗雨, 常凯威, 余江 (2473)
- 施锌对碱性土壤-小麦幼苗体系累积镉的影响 张瑶, 王天齐, 牛硕, 杨阳, 陈卫平 (2479)

北京市制造业减污降碳协同效应分析和驱动因素

俞珊^{1,2}, 韩玉花^{1,2}, 牟洁^{1,2}, 张双^{1,2*}, 张增杰^{1,2}

(1. 北京市生态环境保护科学研究院, 北京 100037; 2. 国家城市环境污染控制工程技术研究中心, 北京 100037)

摘要: 基于北京市2013~2020年制造业大气污染物和CO₂排放数据计算结果, 分析了制造业排放变化特征, 采用协同效应系数评估了制造业减污降碳的协同效果, 并利用LMDI模型量化分析了人口规模、经济发展、产业结构、能耗强度、能源结构和排放强度对于大气污染物排放、CO₂排放以及二者综合的驱动影响程度。结果表明, 北京市制造业排放总体呈下降趋势, 2013~2020年, 大气污染物排放减少了79.2%~92.5%, CO₂排放减少了60.3%, 各项排放在“清空五年”和“蓝天三年”时期呈现不同的阶段性特征。从减污降碳协同效果来看, 各项大气污染物和CO₂的协同效应系数均在0~1之间, 对于大气污染物的减排作用大于CO₂。从各驱动因素影响来看, 能耗强度降低和能源结构优化对于排放的负向拉动作用较大, 排放强度降低对于大气污染物排放具有抑制作用; 从协同减排综合驱动影响来看, 能耗强度降低的协同效果最为明显, 产业结构调整在“蓝天三年”时期的协同效果最佳。

关键词: 制造业; 减污降碳; 协同效应; 驱动因素; 北京市

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)04-1917-09 DOI: 10.13227/j.hjks.202305062

Synergy Effects and Driving Factors of Pollution and Carbon Emission Reduction in Manufacturing Industry in Beijing

YU Shan^{1,2}, HAN Yu-hua^{1,2}, MU Jie^{1,2}, ZHANG Shuang^{1,2*}, ZHANG Zeng-jie^{1,2}

(1. Beijing Municipal Research Institute of Eco-Environmental Protection, Beijing 100037, China; 2. National Engineering Research Centre for Urban Environmental Pollution Control, Beijing 100037, China)

Abstract: Based on the calculation results of air pollutants and CO₂ emissions of the manufacturing industry in Beijing from 2013 to 2020, we analyzed the characteristics of emissions of the manufacturing industry, evaluated the synergistic effect of pollution and carbon emission reduction of the manufacturing industry with synergistic effect coefficients, and used the LMDI model to analyze the driving effects of population size, economic development, industrial structure, energy consumption intensity, energy structure, and emission intensity on air pollutant emissions, CO₂ emissions, and their combination. The results showed that the emissions of the manufacturing industry in Beijing have shown a downward trend; the reduction in rates of air pollutant emissions and CO₂ reached 79.2%-92.5% and 60.3%, respectively, from 2013-2020. The emissions exhibited different phased characteristics from 2013-2017 (during which the Beijing Clean Air Action Plan 2013-2017 was released) and 2018-2020 (during which the Beijing Blue Sky Defense Action Plan was released). From the perspective of the synergistic effects, the synergistic coefficients of air pollutants and CO₂ were between 0 and 1, and the emission reduction effect of air pollutants was greater than that of CO₂. From the perspective of driving factors, the reduction in energy consumption intensity and optimization of energy structure had a greater negative pulling effect on emissions of air pollutants and CO₂, and the reduction in emission intensity had a negative effect on the emissions of air pollutants. From the perspective of the comprehensive driving impact of synergistic emission reduction, the synergistic effect of the reduction in energy consumption intensity was the greatest during 2013-2020, and the synergistic effect of the optimization of industrial structure was the greatest during 2018-2020.

Key words: manufacturing industry; pollution and carbon emissions reduction; synergy effects; driving factors; Beijing

制造业作为实体经济的支柱, 是首都经济增长的重要引擎, 同时也是能源消耗和污染排放的重要来源。2013年以来, 北京市相继发布了本市清洁空气行动计划^[1] (“清空五年”) 和蓝天保卫战行动计划^[2] (“蓝天三年”), 提出要优化产业结构和能源结构, 加快推进工业生产绿色化, 协同推进经济高质量发展和生态环境高水平保护。在制造业领域, 文献[3,4]的发布实施, 明确了北京市制造业绿色转型升级的路径, 提出必须坚持低碳化的发展方向, 建立节能、清洁、循环和低碳的新型生产方式, 以绿色制造推动产业转型升级, 并对制造业能耗水平和污染物排放强度等指标提出了具体要求。近年来, 北京市大力推进制造业领域产业结构和用能结构调整, 传统的高耗能和高排放行业企业已基本完成退

出, 制造业基本实现无燃煤。

2022年, 为落实国家碳达峰碳中和决策部署, 文献[5]正式发布实施, 提出把实现减污降碳协同增效作为促进经济社会发展全面绿色转型的总抓手, 要突出工业等主要领域、重点行业和关键环节, 强化资源能源节约和高效利用, 加快形成有利于减污降碳的产业结构和生产方式。制造业作为工业的主要组成部分, 是减污降碳的重点领域之一。因此, 有必要开展制造业污染物和CO₂协同减排效

收稿日期: 2023-05-08; 修订日期: 2023-07-18

基金项目: 北京市生态环境局项目(H2021-086); 北京市生态环境保护科学研究院项目(JZ2021-011)

作者简介: 俞珊(1984~), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为大气污染物与温室气体协同控制、环境规划与政策和环境承载力, E-mail: yushan@cee.cn

* 通信作者, E-mail: zhangshuang@cee.cn

果评估以及综合驱动影响研究,为助力制造业实现减污降碳协同增效提供技术支撑,同时为相关政策的制定提供科学依据。

学者们对于制造业污染排放和碳排放相关研究集中在京津冀区域^[6-9]、成渝地区^[10, 11]和长三角^[12-15]及珠三角^[16, 17]等制造业较为发达的东部沿海地区,研究内容主要围绕制造业排放趋势预测、协同减排研究和排放驱动影响分析等。对于协同减排的研究方法主要包括协同控制坐标系分析法^[18]、协同控制交叉弹性分析法^[18]、协同减排当量指标^[19]、LEAP模型^[20, 21]、协同效应基准回归分析^[22]和可计算一般均衡模型^[23]等,国内以坐标系法较为常见;排放驱动影响的研究方法包括对数平均迪氏(LMDI)分解模型^[24-27]、STIRPAT模型^[28, 29]、结构分解法(SDA)^[30]和面板向量自回归(PVAR)模型^[31]等,其中,LMDI模型因能够消除分解过程中残差影响的优点^[32]而得到了广泛的应用。有研究表明,在协同减排方面,制造业通过园区集聚发展和园区循环改造可以有效降低污染物及碳排放^[33-36],钢铁^[37, 38]和水泥^[39, 40]等重工业通过结构调整和工程措施可实现协同减排;在驱动因素影响方面,技术进步和能效提升是制造业大气污染物减排的主要影响因素^[10, 34, 41],优化产业结构和降低能源强度是CO₂减排的关键因素^[15, 42-45]。目前,从协同减排效果评估来看,现有研究多偏重于对某一行业(如石化、水泥或钢铁行业等)的减排措施进行协同效果评估,对于长时间序列下制造业整体减污降碳效果的评估较少;从驱动影响因素分析来看,针对制造业的排放驱动研究多是单独围绕污染物或者CO₂展开的,对于二者协同的驱动影响研究相对不足,还有待进一步深入。

本研究以北京市制造业为研究对象,基于经济社会发展相关参数,计算了2013~2020年北京市制造业大气污染物和CO₂排放量,分析了排放量变化趋势和阶段特征。采用协同效应系数开展了制造业减污降碳协同效果评估,并利用LMDI模型对制造业排放驱动因素进行了分解,量化分析了各驱动因素对于大气污染物排放、CO₂排放以及二者综合的影响程度,以期为推动北京市制造业绿色低碳转型、实现减污降碳协同增效提供科学借鉴。

1 材料与方法

1.1 大气污染物和CO₂排放量计算

以SO₂、NO_x和烟(粉)尘等大气污染物和CO₂为研究对象,计算2013~2020年北京市制造业大气污染物与CO₂排放量。本研究仅考虑生产过程产生的直

接排放,不考虑电力和热力等终端能源使用的间接排放,大气污染物和CO₂的计算方法分别见公式(1)和公式(2)。

$$E_{AP} = \sum A_i \times EF_{APi} \times (1 - \eta_{APi}) \quad (1)$$

式中, E_{AP} 为制造业生产过程大气污染物排放量; A_i 为制造业*i*行业的产品产量、原辅材料用量或燃料; EF_{APi} 为制造业*i*行业的大气污染物排放因子; η_{APi} 为制造业*i*行业大气污染控制技术对污染物的去除效率。

$$E_{CO_2} = \sum A_j \times \lambda_j \times EF_{CO_2j} \quad (2)$$

式中, E_{CO_2} 为制造业CO₂排放量; A_j 为第*j*种能源消费实物量; λ_j 为第*j*种能源的标煤折算系数; EF_{CO_2j} 为第*j*种能源的标煤CO₂排放因子,其中,煤炭、天然气和燃料油的排放因子(以CO₂/标准煤计)参照生态环境部《省级二氧化碳排放达峰行动方案编制指南》,分别为2.66、1.56和1.73 t·t⁻¹。

1.2 协同效应系数

协同效应系数参照文献^[27, 46, 47],可分级定量分析大气污染和CO₂的协同减排效应,计算方法见公式(3)。协同效应级别划分如表1所示。

$$S = \frac{\Delta E_{CO_2}/E_{CO_2}}{\Delta E_{AP}/E_{AP}} \quad (3)$$

式中, S 为协同效应系数; ΔE_{CO_2} 为当年CO₂相对于上年的减排量; E_{CO_2} 为上年CO₂排放量; ΔE_{AP} 为当年大气污染物相对于上年的减排量; E_{AP} 为上年大气污染物排放量。

表1 协同效应级别划分
Table 1 Classification of synergy effects

序号	协同效应系数(S)值	含义
1	$S \leq 0$	不具备协同效应
2	$0 < S < 0.5$	协同效应一般,对大气污染物的减排程度更高
3	$0.5 \leq S < 1$	协同效应较好,对大气污染物的减排程度高于CO ₂
4	$S = 1$	协同效应最佳,对大气污染物和CO ₂ 的减排程度相同
5	$1 < S \leq 2$	协同效应较好,对CO ₂ 的减排程度高于大气污染物
6	$S > 2$	协同效应一般,对CO ₂ 的减排程度更高

1.3 排放当量计算

为了反映大气污染物和CO₂的综合排放情况,采用排放当量来分析各因素的影响程度。由于价格是唯一能够反映二者对经济和环境的综合影响^[38],因此将价格作为排放当量的折算依据,参照Zhang等^[19]和何峰等^[39]的研究,北京市制造业大气污染物和CO₂排放当量计算见公式(4)。

$$E_{eq} = W_{LAP} \times \sum \alpha_i \times ER_i + W_{CO_2} \times ER_{CO_2} \quad (4)$$

式中, E_{eq} 为排放当量, W_{LAP} 和 W_{CO_2} 分别为大气污染

物和CO₂减排量的相对权重, α_i 为第*i*种大气污染物的折算系数; ER_i 和 ER_{CO_2} 分别为第*i*种大气污染物

和CO₂的减排量. 协同减排当量指标各系数设置见表2.

表2 排放当量系数设置
Table 2 Setting of emission equivalent coefficient

参数	取值	取值说明
W_{LAP}	1(以 IAPeq/LAPeq 计)	北京市应税大气污染物适用税额标准为 12 元·污染当量 ⁻¹ (12 元·LAPeq ⁻¹), 权重值设置为 1LAPeq = 1IAPeq
W_{CO_2}	0.005 kg ⁻¹ (以 IAPeq /CO ₂ eq 计)	根据北京市碳排放配额年度成交均价, 约为 60 元·t ⁻¹ , 结合大气污染物适用税额标准, 设置 CO ₂ 的权重值(以 CO ₂ eq 计)为 0.005 IAPeq·kg ⁻¹
$\alpha(SO_2)$	1/0.95 kg ⁻¹ (以 LAPeq 计)	
$\alpha(NO_x)$	1/0.95 kg ⁻¹ (以 LAPeq 计)	根据国家环境保护税法中的污染当量值来确定 ^[48]
$\alpha(\text{烟粉尘})$	1/2.18 kg ⁻¹ (以 LAPeq 计)	

1.4 驱动因素分解

以 2013 年为基准年, 采用 LMDI 模型对北京市制造业大气污染物排放量、CO₂排放量以及二者的排放当量进行分解, 以此分析各驱动因素的影响程度. 本研究选择人口规模、经济发展、产业结构、制造业能耗强度、制造业能源结构和制造业排放强度作为驱动因素. 北京市制造业大气污染物排放量、CO₂排放量和排放当量分解见公式(5).

$$C = \sum_{j=1}^n P \times \frac{G}{P} \times \frac{M}{G} \times \frac{E}{M} \times \frac{S_j}{E} \times \frac{C_j}{S_j} \\ = \sum_{j=1}^n C_{p,j} \times C_{g,j} \times C_{m,j} \times C_{e,j} \times C_{s,j} \times C_{t,j} \quad (5)$$

式中, C 为大气污染物排放量、CO₂排放量和排放当量; n 为制造业消耗的能源品种数量; P 为人口数量; G 为地区生产总值(GDP); M 为制造业增加值; E 为制造业能源消费总量; S_j 为第*j*种能源的消费量, C_j 为第*j*种能源的大气污染物或 CO₂排放量. $C_{p,j}$ 、 $C_{g,j}$ 、 $C_{m,j}$ 、 $C_{e,j}$ 、 $C_{s,j}$ 和 $C_{t,j}$ 分别为: 人口规模效应、经济发展效应、产业结构效应、能源强度效应、能源结构效应和排放强度效应. 在此基础上, T 时期内的排放总量变化分解见公式(6).

$$\Delta C = C^T - C^0 = \Delta C_{p,j} + \Delta C_{g,j} + \Delta C_{m,j} + \Delta C_{e,j} + \Delta C_{s,j} + \Delta C_{t,j} \quad (6)$$

式中, ΔC 为 T 时期内大气污染物、CO₂排放和当量的排放变化量; C^T 为第 T 年的排放量; C^0 为基准年的排放量; $\Delta C_{p,j}$ 、 $\Delta C_{g,j}$ 、 $\Delta C_{m,j}$ 、 $\Delta C_{e,j}$ 、 $\Delta C_{s,j}$ 和 $\Delta C_{t,j}$ 分别为人口规模、经济发展、产业结构、能源强度、能源结构和排放强度对于排放的贡献量.

在公式(6)基础上, 利用 LMDI 加法分解形式对排放量进行分解. 分解结果若为正, 表示该因素的变化促进大气污染物或 CO₂排放; 若为负, 则表示该因素能减少大气污染物或 CO₂排放. 各驱动因素对排放量的贡献可以分解为:

$$\Delta C_{p,j} = \sum_j \frac{C_j^T - C_j^0}{\ln C_j^T - \ln C_j^0} \times \ln \frac{C_{p,j}^T}{C_{p,j}^0} \quad (7)$$

$$\Delta C_{g,j} = \sum_j \frac{C_j^T - C_j^0}{\ln C_j^T - \ln C_j^0} \times \ln \frac{C_{g,j}^T}{C_{g,j}^0} \quad (8)$$

$$\Delta C_{m,j} = \sum_j \frac{C_j^T - C_j^0}{\ln C_j^T - \ln C_j^0} \times \ln \frac{C_{m,j}^T}{C_{m,j}^0} \quad (9)$$

$$\Delta C_{e,j} = \sum_j \frac{C_j^T - C_j^0}{\ln C_j^T - \ln C_j^0} \times \ln \frac{C_{e,j}^T}{C_{e,j}^0} \quad (10)$$

$$\Delta C_{s,j} = \sum_j \frac{C_j^T - C_j^0}{\ln C_j^T - \ln C_j^0} \times \ln \frac{C_{s,j}^T}{C_{s,j}^0} \quad (11)$$

$$\Delta C_{t,j} = \sum_j \frac{C_j^T - C_j^0}{\ln C_j^T - \ln C_j^0} \times \ln \frac{C_{t,j}^T}{C_{t,j}^0} \quad (12)$$

1.5 数据来源

大气污染物和 CO₂排放量计算涉及的制造业产品产量、原辅材料用量和分品种能源消费量等活动水平数据来自《北京统计年鉴(2014~2021)》^[49]和相关企业的社会责任报告. 大气污染物排放因子参照《排放源统计调查产排污核算方法和系数手册》^[50], 去除效率根据企业实地调研获得; CO₂排放因子参照生态环境部《省级二氧化碳排放达峰行动方案编制指南》, 能源折标系数按照北京市 2013~2020 年能源消费实物量和标准量均值进行折算. 驱动因素分解涉及的人口、GDP、制造业增加值和制造业分品种能源消费量来自《北京统计年鉴(2014~2021)》, 其中 GDP 和制造业增加值以 2013 年不变价计算.

2 结果与讨论

2.1 排放趋势特征

北京市制造业大气污染物和 CO₂排放量以及相关的经济社会发展指标变化趋势见图 1. 2013~2020 年, 制造业排放总体呈下降趋势, SO₂、NO_x、烟(粉)尘和 CO₂排放量分别减少了 92.5%、79.2%、88.0% 和 60.3%.

本研究选择人口、GDP、制造业增加值、制造业煤炭和天然气消费量、水泥产量和原油加工量等与制造业排放相关的经济社会参数进行了趋势分

析, 2013~2020年, 人口、GDP、制造业增加值和制造业天然气消费量分别增长了3.51%、50.17%、27.85%和14.81%, 制造业煤炭消费量、水泥产量和原油加工量分别减少了85.67%、66.96%和11.56%。通过经济社会相关参数和排放数据的对比分析可以得出, 2013~2020年, 北京市在经济社会和制造业平稳发展的同时, 通过优化调整制造业内部产业结构和能源结构, 实现了制造业排放显著降低。

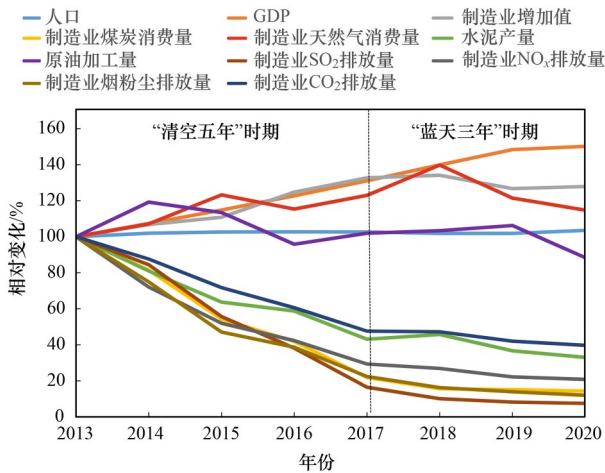


图1 2013~2020年北京市制造业排放和经济社会发展情况

Fig. 1 Manufacturing industry emissions and socio-economic development in Beijing from 2013 to 2020

北京市制造业大气污染物和CO₂排放阶段性特征明显。其中, 2013~2017年(“清空五年”时期), 北京市制造业排放呈快速下降趋势, 大气污染物减排均在70%以上, CO₂减排了52.40%。2018~2020年(“蓝天三年”时期), 制造业各项排放呈稳定下降趋势, 大气污染物减排在29.11%~54.41%, CO₂减排了16.51%。总体来看, 北京市制造业排在“清空五年”时期的下降速度要明显快于“蓝天三年”时期, 该结论与陈敏^[10]的研究结论一致。这是由于北京市在“清空五年”时期基本完成规模以上工业燃煤锅炉清洁能源改造, 实施了水泥生产脱硝和工业窑炉除尘设施升级改造等末端治理减排工程, 在大幅减少大气污染物排放的同时有效带动碳减排。随着工程减排空间的收窄, “蓝天三年”时期北京市制造业治理的方向和重点发生了变化, 更加注重结构调整和标准提升等管理减排措施, 制造业排放下降速度相对趋缓。各阶段减排比例见表3。

2.2 协同效应分析

采用协同效应系数分析北京市制造业减污降碳协同效应, 结果见图2。制造业各项大气污染物和CO₂的协同效应系数均大于0, 说明2013~2020年北京市制造业实施的减排措施具有减污降碳协同效应, 且各系数范围在0.02~0.96, 均在0~1之间, 说明

表3 各阶段制造业减排比例¹⁾/%

Table 3 Emission reduction ratio of manufacturing industry in each stage/%

阶段	SO ₂	NO _x	烟(粉)尘	CO ₂
2013~2020年	92.49	79.18	87.98	60.25
2013~2017年	83.53	70.63	77.60	52.40
2018~2020年	54.41	29.11	46.35	16.51

1) 2018~2020年各项污染物和CO₂的减排比例以2017年排放量为基数计算

减排措施对大气污染物的减排作用要大于CO₂。其中, 在2015年、2016年和2019年, 各项大气污染物和CO₂的协同效应系数均在0.5~1之间, 协同效应较好; 在2018年, 协同效应系数均降到0.1以下, 协同程度一般, 这是由于2018年北京市原油加工量和水泥产量略有上升, 分别较2017年增加了1.38%和6.04%, 制造业天然气消费总量增加了13.65%, 导致制造业CO₂的减排程度要小于大气污染物, 说明石化和水泥等两高行业的产能增加会导致协同效应系数减小, 对于制造业减污降碳影响较大。

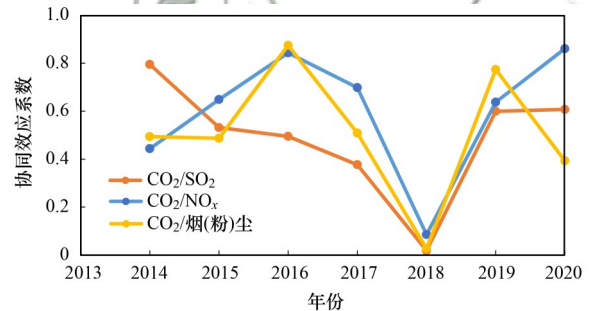


图2 北京市2014~2020年制造业协同效应系数

Fig. 2 Synergistic effect coefficients of manufacturing industry in Beijing from 2014 to 2020

2.3 驱动影响分析

采用LMDI模型对北京市2013~2020年制造业SO₂、NO_x、烟(粉)尘和CO₂排放量以及排放当量进行驱动因素分解, 并按照2013~2017年(“清空五年”时期)和2018~2020年(“蓝天三年”时期)进行分阶段分解, 分别见表4和图3。

总体来看, 人口规模和经济发展对于排放起正向促进作用。其中, 人口规模在2013~2020年对于各项排放增加的贡献率在1.19%~2.06%之间, 在2013~2017年的贡献率均在1.19%以上, 2018~2020年下降到0.7%左右。这是由于2017年发布实施了北京城市总体规划(2016~2035年)^[51]提出了严格控制人口规模, 通过疏解非首都功能实现人随功能走、人随产业走, 因此2017年之后北京市人口增长放缓, 部分年份出现负增长的情况, 故“蓝天三年”时期人口规模对于排放的正向拉动有所减弱。经济发展在各阶段对于排放的推动作用均较为明

表 4 驱动因素贡献率¹⁾/ %
Table 4 Contribution rate of driving factors/ %

项目	阶段	人口规模	经济发展	产业结构	能耗强度	能源结构	排放强度
SO ₂	2013 ~ 2020 年	1.19	12.88	-5.57	-31.98	-40.77	-28.24
	2013 ~ 2017 年	1.19	11.19	0.58	-37.33	-42.47	-16.70
	2018 ~ 2020 年	0.58	8.78	-11.95	-7.45	-15.93	-28.45
NO _x	2013 ~ 2020 年	1.67	17.98	-7.78	-44.65	-35.27	-11.13
	2013 ~ 2017 年	1.45	13.61	0.70	-45.39	-30.22	-10.77
	2018 ~ 2020 年	0.71	10.79	-14.67	-9.15	-9.85	-6.94
烟(粉)尘	2013 ~ 2020 年	1.38	14.87	-6.43	-36.92	-28.56	-32.32
	2013 ~ 2017 年	1.33	12.42	0.64	-41.44	-28.35	-22.20
	2018 ~ 2020 年	0.62	9.47	-12.87	-8.03	-9.13	-26.41
CO ₂	2013 ~ 2020 年	2.06	22.24	-9.62	-55.21	-19.73	/
	2013 ~ 2017 年	1.74	16.27	0.84	-54.28	-16.97	/
	2018 ~ 2020 年	0.77	11.64	-15.82	-9.86	-3.22	/
排放当量	2013 ~ 2020 年	1.81	19.48	-8.42	-48.36	-27.16	-8.93
	2013 ~ 2017 年	1.56	14.66	0.76	-48.89	-24.43	-6.83
	2018 ~ 2020 年	0.74	11.20	-15.23	-9.49	-5.61	-4.45

1)2018 ~ 2020 年各因素对大气污染物和 CO₂ 的排放贡献率以 2017 年相关数据为基数计算

显，其中 2013 ~ 2020 年对于各项大气污染物的贡献率在 12.88% ~ 17.98% 之间，对于 CO₂ 和排放当量的

贡献率分别为 22.24% 和 19.48%，由此可以看出经济发展对于 CO₂ 的排放贡献大于大气污染物。

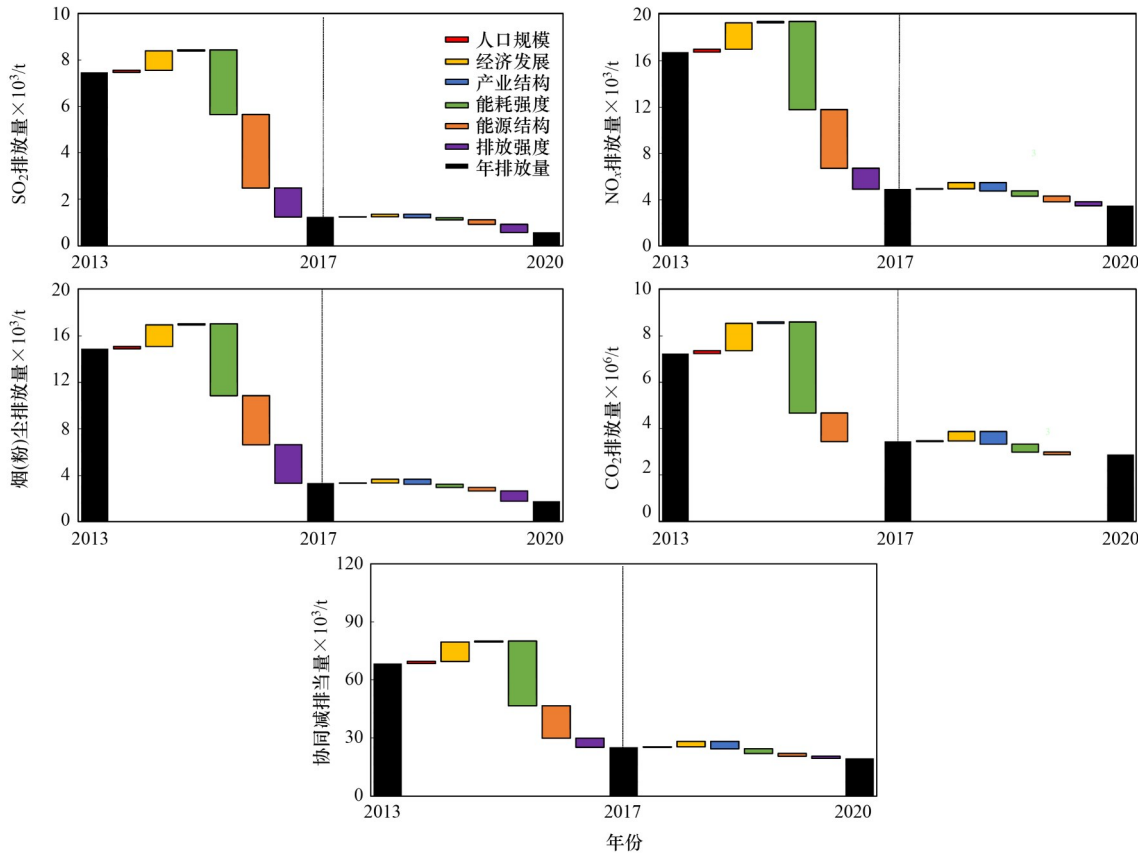


图 3 分阶段驱动因素贡献情况
Fig. 3 Contribution of phased driving factors

能耗强度降低对于制造业排放降低的贡献最大，2013 ~ 2020 年，对各项大气污染物的排放贡献率在 -31.98% ~ -44.65% 之间，对于 CO₂ 的排放贡献率为 -55.21%。特别是在 2013 ~ 2017 年，北京市开展

了百项节能标准建设专项，制、修订了汽车行业三项单车能耗限额标准和乙烯单位产品能源消耗限额等一系列工业节能标准，实施了重点企业的能效提升、清洁生产和资源循环利用等技术改造，制造业

生产所用能耗强度下降了56%左右,对大气污染物排放贡献为-37.33%~-45.39%,对CO₂排放贡献为-54.28%。能耗强度降低对于排放当量的贡献也最为显著,在2013~2020年和2013~2017年,其贡献率均接近-50%,这是由于大气污染物和CO₂排放同根同源的特征,减少能源消费能显著降低二者的排放^[52],对于二者的协同减排效果最为明显。

能源结构优化对于制造业排放降低的贡献也较为明显,2013~2020年,对大气污染物的排放贡献率分别在-28.56%~-40.77%,对于CO₂的排放贡献为-19.73%。特别是在2013~2017年,“清空五年”提出通过清洁能源改造等方式减少企业生产煤炭使用量,并实施了重点行业燃煤压减,开展了工业企业燃煤锅炉清洁能源改造,制造业煤炭消费减少了78%以上,煤炭消费比重由2013年的60.9%降至2017年的22.7%,同时,制造业天然气消费量上升了23.0%,比重由36.6%升至76.7%,能源结构优化在“清空五年”时期对大气污染物排放的贡献率在-28.35%~-42.47%,对于CO₂排放贡献率为-16.97%。2018~2020年,制造业煤炭消费比重降至17.2%,天然气消费比重升至82.8%,与“清空五年”时期相比变化不显著,对于大气污染物排放的贡献率在-9.85%~-15.93%,对CO₂排放贡献仅为-3.22%,因此能源结构优化在“蓝天三年”时期对于制造业的排放贡献小于“清空五年”时期。

排放强度降低对于大气污染物排放削减有一定的贡献作用,2013~2020年,通过加严排放标准和工程治理等措施有效地降低了大气污染物排放,对SO₂、NO_x和烟(粉)尘排放的贡献率分别为-28.24%、-11.13%和-32.32%。其中,排放强度降低在2013~2017年对于NO_x减排贡献更明显,这是由于在2013年和2015年北京市分别发布了水泥工业大气污染物排放标准和锅炉大气污染物排放标准两项地方标准,开展了水泥生产脱硝和燃气锅炉低氮改造,且在2017年基本完成改造,水泥生产和燃气锅炉的NO_x排放因子分别降低了50%和60%左右,对于制造业NO_x的排放贡献为-10.77%。2018~2020年,排放强度降低对于烟(粉)尘的减排贡献较明显,这源于“蓝天三年”时期对使用水泥和砂石等粉状物料的重点行业实施了物料运输、装卸、储存、转移和工艺过程等无组织深度治理,修订了预拌混凝土绿色生产管理规程地方标准,发布了搅拌站密闭提标改造的通知,加大了对预拌混凝土的绿色生产管理和搅拌站密闭化升级改造,对于烟(粉)尘的排放贡献为-26.41%。2013~2020年,北京市制造业企业尚未开展碳捕集、利用与封存(CCUS)等减少碳排放技

术的规模化应用,因此排放强度降低对于CO₂排放基本无贡献。

产业结构调整在2013~2020年对于制造业排放总体上为负向驱动影响,但存在阶段性差异。其中,在2013~2017年,随着制造业的发展,制造业增加值占GDP的比重有所提升,产业结构对于大气污染物和CO₂排放有小幅的推动作用,贡献率在0.58%~0.84%之间。2018~2020年,由于发展高精尖产业和退出一般性制造业被写入北京城市总体规划,北京市加大了对高精尖制造业的发展力度,实施了污染物排放较大、能耗较高、工艺落后和不符合首都城市战略定位的一般制造业和污染企业退出,但受新旧动能转化影响,在2018~2020年制造业增加值占比仍有所下降,由13.95%降至11.73%,对于大气污染物和CO₂排放贡献为-11.95%~-15.82%,产业结构调整减排作用在“蓝天三年”时期开始显现;由于产业结构优化升级从源头上减少了大气污染和CO₂排放,因此在2018~2020年对于二者排放当量的负向驱动贡献最大,达到-15.2%。

3 建议

(1)优化调整制造业内部结构。北京市在“清空五年”和“蓝天三年”时期均提出通过优化产业结构来实现污染物的源头削减,并实现了在减污的同时有效带动降碳。然而,北京市石化和建材两个传统行业的增加值占制造业总增加值不足5%,但其带来的主要大气污染物排放量占制造业排放总量的85%以上,CO₂占比在55%以上。未来在碳达峰碳中和战略背景下,应更加关注降碳的源头牵引作用,深度优化制造业内部结构,大力发展高端智能绿色的高精尖制造业,严控、压减在京石化生产规模和剩余水泥产能,加大对能耗较高和排放较大的工业行业和工艺设备淘汰力度,持续推动不符合首都功能定位的一般制造业企业动态调整退出。同时,应严格北京市新建项目环境准入,针对制造业大气污染物和CO₂排放,对标世界先进水平,制定科学性和有效性的环保准入要求。

(2)推进节能提效改造升级。减少能源消耗和提高能源利用效率是制造业减污降碳的重要方向。虽然北京市高精尖制造业能耗强度低于制造业平均水平,但汽车、电子和医药等行业能耗强度高于广州和深圳等国内重点城市,仍有能效提升空间。未来建议重点围绕北京市重点发展的高精尖制造业,开发节约能源工艺,实施企业能源低碳智慧管控,对标国际先进水平和能效标杆水平开展清洁生产技术改造。此外,推广制造业高能效设备,逐步淘汰高

耗能通用设备,针对电机系统和变压器等重点通用设备,开展节能技术改造,实施升级替代,提高重点通用设备的运行能效指标。

(3)加快推进减污降碳技术攻关和应用。根据北京市相关规划,制造业增加值占地区生产总值的比重将由2020年的11.7%上升至13%~15%,在未采取进一步措施的情况下,会带来潜在的大气污染物和CO₂排放,给减污降碳工作带来较大压力和挑战。建议加强制造业减污降碳技术研发和应用,大气污染物治理优先采用源头替代措施,选取低耗高效组合工艺进行治理,开展减污降碳改造提升试点工程。特别是在降碳方面,应立足北京国际科技创新中心建设,充分发挥北京市高校和科研院所的优势,针对制造业绿色低碳发展技术创新需求,开展低碳、零碳和负碳关键技术攻关,促进制造业近零排放和绿色技术替代。

(4)提升制造业电力占终端能源消费比重。北京市制造业电力占终端能源消费的比重低于全国平均水平,未来应以电能替代为方向,持续优化制造业能源结构,减少化石能源的直接使用。建议北京市在无煤化的基础上,进一步降低制造业天然气消费,提高终端能源消费电气化水平和绿电使用比例。一方面,针对重点行业企业,以及加热和烘干等环节,推广电锅炉和电加热技术,扩大电气化终端能源设备的使用比例;另一方面,加强工业企业和园区绿色微电网建设,鼓励开展厂房光伏和分布式风电的开发和应用。

4 结论

(1)从制造业排放趋势来看,2013~2020年,北京市制造业排放总体呈下降趋势,大气污染物排放减少了79.2%~92.5%,CO₂排放减少了60.3%。其中,“清空五年”和“蓝天三年”期间,治理手段逐渐由工程减排向管理减排转变,制造业各项排放均呈现不同的阶段性特征,由2013~2017年的“加速减排期”过渡到2018~2020年的“稳定减排期”。

(2)从减污降碳协同效果来看,2013~2020年,各项大气污染物和CO₂的协同效应系数均在0~1之间,说明对于大气污染物的减排作用大于CO₂。2018年,由于石化和水泥行业产能增加,协同效应系数均降到0.1以下,协同程度一般。

(3)从各驱动因素影响来看,人口规模和经济对于排放起正向拉动作用,能耗强度降低和能源结构优化对于减排的贡献较大,排放强度降低对于大气污染物具有减排效果,产业结构调整在“蓝天三年”时期的减排效果开始显现。针对大气污染

物和CO₂的协同减排综合驱动影响来看,能耗强度降低的协同效果最为明显,在“清空五年”时期尤为显著;产业结构调整在“蓝天三年”时期的协同效果最佳。

参考文献:

- [1] 北京市人民政府.北京市2013-2017年清洁空气行动计划[EB/OL]. https://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefagui/201905/t20190522_59933.html, 2017-01-03.
- [2] 北京市人民政府.关于印发《北京市打赢蓝天保卫战三年行动计划》的通知[EB/OL]. https://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefagui/201905/t20190522_61552.html, 2018-09-14.
- [3] 北京市经济和信息化委员会,北京市发展和改革委员会.北京市“十三五”时期工业转型升级规划[EB/OL]. http://fgw.beijing.gov.cn/fgwzgw/zcgk/ghjhw/wnjh/202204/t20220413_2675020.htm, 2017-05-24.
- [4] 北京制造业创新发展领导小组.关于印发《北京绿色制造实施方案》的通知[EB/OL]. https://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefagui/201905/t20190522_59731.html, 2016-12-08.
- [5] 生态环境部,国家发展和改革委员会,工业和信息化部,等.关于印发《减污降碳协同增效实施方案》的通知[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk03/202206/t20220617_985879.html, 2022-06-10.
- [6] Yu X H, Liang Z F, Fan J J, et al. Spatial decomposition of city-level CO₂ emission changes in Beijing-Tianjin-Hebei[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **296**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126613.
- [7] Shu Y, Hu J N, Zhang S H, et al. Analysis of the air pollution reduction and climate change mitigation effects of the three-year action plan for blue skies on the “2+26” cities in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, **317**, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.115455.
- [8] 李涛,薛领,赵威.产业结构调整对城市PM_{2.5}的影响机理[J]. *经济地理*, 2023, **43**(5): 180-192.
- Li T, Xue L, Zhao W. Influencing mechanism of industrial structure adjustment on urban PM_{2.5} in China [J]. *Economic Geography*, 2023, **43**(5): 180-192.
- [9] 孙铁山,刘禹圻.京津冀城市工业对雾霾污染影响的溢出效应——基于制造业投资城市网络的视角[J]. *地理科学进展*, 2023, **42**(2): 237-248.
- Sun T S, Liu Y Q. Spillover effects of urban industries on haze pollution among cities of the Beijing-Tianjin-Hebei region: from the perspective of inter-city manufacturing investment network[J]. *Progress in Geography*, 2023, **42**(2): 237-248.
- [10] 陈敏,李振亮,段林丰,等.成渝地区工业大气污染物排放的时空演化格局及关键驱动因素[J]. *环境科学研究*, 2022, **35**(4): 1072-1081.
- Chen M, Li Z L, Duan L F, et al. Spatiotemporal patterns and key driving forces of industrial air pollutant discharge in Chengdu-Chongqing region[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, **35**(4): 1072-1081.
- [11] 王敏,冯相昭,杜晓林,等.工业部门污染物治理协同控制温室气体效应评价——基于重庆市的实证分析[J]. *气候变化研究进展*, 2021, **17**(3): 296-304.
- Wang M, Feng X Z, Du X L, et al. Evaluation of co-controlling GHGs from pollutant reduction facilities in the industrial sectors, empirical analysis based on data in Chongqing City [J]. *Climate Change Research*, 2021, **17**(3): 296-304.
- [12] Guo Y, Zeng Z Z, Tian J P, et al. Uncovering the strategies of green development in a Chinese province driven by reallocating the

- emission caps of multiple pollutants among industries[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **607-608**: 1487-1496.
- [13] 王兆峰, 李竹, 吴卫. 长江经济带不同等级城市碳排放的时空演变及其影响因素[J]. *环境科学研究*, 2022, **35**(10): 2273-2281.
- Wang Z F, Li Z, Wu W. Spatio-temporal evolution and influencing factors of carbon emissions in different grade cities in the Yangtze River economic belt [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, **35**(10): 2273-2281.
- [14] 李芸邑, 刘利萍, 刘元元. 长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素[J]. *环境科学*, 2021, **42**(8): 3820-3828.
- Li Y Y, Liu L P, Liu Y Y. Spatial distribution pattern and influencing factors of industrial pollution emissions in Yangtze River economic belt [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 3820-3828.
- [15] 吕一铮, 曹晨玥, 田金平, 等. 减污降碳协同视角下沿海制造业发达地区产业结构调整路径研究[J]. *环境科学研究*, 2022, **35**(10): 2293-2302.
- Lü Y Z, Cao C Y, Tian J P, *et al.* Industrial structure adjustment path in coastal areas with developed manufacturing industries from perspective of synergistic reduction of pollutants and CO₂ emissions [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, **35**(10): 2293-2302.
- [16] 周振, 肖林海, 费蕾蕾, 等. 东莞工业集中区夏季臭氧污染与非污染期间 VOCs 组分特征及其来源[J]. *环境科学*, 2022, **43**(9): 4497-4505.
- Zhou Z, Xiao L H, Fei L L, *et al.* Characteristics and source apportionment of volatile organic compounds (VOCs) in a typical industrial area in Dongguan during periods of ozone and non-ozone pollution in summer [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(9): 4497-4505.
- [17] 宋鑫, 袁斌, 王思行, 等. 珠三角典型工业区挥发性有机物 (VOCs) 组成特征: 含氧挥发性有机物的重要性[J]. *环境科学*, 2023, **44**(3): 1336-1345.
- Song X, Yuan B, Wang S H, *et al.* Compositional characteristics of volatile organic compounds in typical industrial areas of the Pearl River Delta: importance of oxygenated volatile organic compounds [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(3): 1336-1345.
- [18] 毛显强, 邢有凯, 高玉冰, 等. 温室气体与大气污染物协同控制效应评估与规划[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(7): 3390-3398.
- Mao X Q, Xing Y K, Gao Y B, *et al.* Study on GHGs and air pollutants co-control: assessment and planning [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(7): 3390-3398.
- [19] Zhang Q Y, Cai B F, Wang M D, *et al.* City level CO₂ and local air pollutants co-control performance evaluation: a case study of 113 key environmental protection cities in China [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2022, **13**(1): 118-130.
- [20] Jiang J J, Ye B, Shao S, *et al.* Two-Tier synergic governance of greenhouse gas emissions and air pollution in China's megacity, Shenzhen: impact evaluation and policy implication [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, **55**(11): 7225-7236.
- [21] 吴乐敏, 陈丙寅, 欧林冲, 等. 东莞市低碳路径下加速电气化对 CO₂ 和污染物协同减排影响[J]. *环境科学*, 2023, **44**(12): 6653-6663.
- Wu L M, Chen B Y, Ou L C, *et al.* Impact of accelerated electrification under the low carbon path in Dongguan City on the coordinated emission reduction of CO₂ and pollutants [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(12): 6653-6663.
- [22] 陈晓红, 张嘉敏, 唐湘博. 中国工业减污降碳协同效应及其影响机制[J]. *资源科学*, 2022, **44**(12): 2387-2398.
- Chen X H, Zhang J M, Tang X B. Synergistic effect of industrial air pollution and carbon emission reduction in China and influencing mechanism [J]. *Resources Science*, 2022, **44**(12): 2387-2398.
- [23] Song P, Mao X Q, Li Z Y, *et al.* Study on the optimal policy options for improving energy efficiency and co-controlling carbon emission and local air pollutants in China [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, **175**, doi: 10.1016/j.rser.2023.113167.
- [24] Yang P G, Liang X, Drohan P J. Using Kaya and LMDI models to analyze carbon emissions from the energy consumption in China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**(21): 26495-26501.
- [25] Alajmi R G. Factors that impact greenhouse gas emissions in Saudi Arabia: decomposition analysis using LMDI [J]. *Energy Policy*, 2021, **156**, doi: 10.1016/j.enpol.2021.112454.
- [26] Yang J, Cai W, Ma M D, *et al.* Driving forces of China's CO₂ emissions from energy consumption based on Kaya-LMDI methods [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **711**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134569.
- [27] Wen L, Li Z K. Provincial-level industrial CO₂ emission drivers and emission reduction strategies in China: combining two-layer LMDI method with spectral clustering [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **700**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134374.
- [28] 刘茂辉, 岳亚云, 刘胜楠, 等. 基于 STIRPAT 模型天津减污降碳协同效应多维度分析[J]. *环境科学*, 2023, **44**(3): 1277-1286.
- Liu M H, Yue Y Y, Liu S N, *et al.* Multi-dimensional analysis of the synergistic effect of pollution reduction and carbon reduction in Tianjin based on the STIRPAT model [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(3): 1277-1286.
- [29] 杨洋. 黑龙江省能源消费大气污染物与 CO₂ 减排协同效应研究[D]. 黑龙江: 哈尔滨师范大学, 2023.
- Yang Y. Research on synergistic effect of energy consumption air pollutions and CO₂ emission reduction in Heilongjiang province [D]. Heilongjiang: Harbin Normal University, 2023.
- [30] 姜钰卿, 唐旭, 任凯鹏, 等. 基于双层嵌套 SDA 的中国减污降碳驱动因素研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2022, **42**(12): 3294-3304.
- Jiang Y Q, Tang X, Ren K P, *et al.* Research on the drivers of pollution and carbon reduction in China based on double-layer nested SDA [J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2022, **42**(12): 3294-3304.
- [31] 冯俊华, 韩美. 技术创新与碳排放效率耦合协调关系及驱动力研究——以装备制造业细分行业为例[J]. *环境污染与防治*, 2023, **45**(1): 128-132.
- Feng J H, Han M. Research on the coupling coordination and driving force of technological innovation and carbon emission efficiency: taking the sub-sectors of equipment manufacturing industry as an example [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2023, **45**(1): 128-132.
- [32] Shang Y Z, Lu S B, Shang L, *et al.* Decomposition methods for analyzing changes of industrial water use [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, **543**: 808-817.
- [33] 刘旭, 周震. 基于北京市制造产业聚集形势变化与管理研究[J]. *环境科学与管理*, 2022, **47**(8): 10-14.
- Liu X, Zhou Z. Research and management suggestions based on changes in Beijing's manufacturing industry agglomeration [J]. *Environmental Science and Management*, 2022, **47**(8): 10-14.
- [34] 张平淡, 屠西伟. 制造业集聚与雾霾: 基于能源消费的异质性

- 分析[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2022, **24**(6): 30-40.
- Zang P D, Tu X W. Manufacturing agglomeration and haze: Heterogeneity analysis based on energy consumption[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2022, **24**(6): 30-40.
- [35] 赵若楠, 马中, 乔琦, 等. 中国工业园区绿色发展政策对比分析及对策研究[J]. 环境科学研究, 2020, **33**(2): 511-518.
- Zhao R N, Ma Z, Qiao Q, *et al.* Comparative analysis of green development policies of China's industrial parks and countermeasure research[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, **33**(2): 511-518.
- [36] 杨儒浦, 王敏, 胡敬韬, 等. 工业园区减污降碳协同增效评价方法及实证研究[J]. 环境科学研究, 2023, **36**(2): 422-430.
- Yang R P, Wang M, Hu J T, *et al.* Evaluation method and empirical study on synergistic reduction of pollution and carbon emissions in industrial parks [J]. Research of Environmental Sciences, 2023, **36**(2): 422-430.
- [37] 朱廷钰, 刘霄龙. 中国钢铁行业“超低排放”向“减污降碳”过渡的技术思考[J]. 过程工程学报, 2022, **22**(10): 1360-1367.
- Zhu T Y, Liu X L. Technical consideration on the transition from “ultra-low emissions” to “reduction of pollution and carbon emissions” in China's iron and steel industry [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2022, **22**(10): 1360-1367.
- [38] 高玉冰, 邢有凯, 何峰, 等. 中国钢铁行业节能减排措施的协同控制效应评估研究[J]. 气候变化研究进展, 2021, **17**(4): 388-399.
- Gao Y B, Xing Y K, He F, *et al.* Research on co-control effectiveness evaluation of energy saving and emission reduction measures in China's iron and steel industry [J]. Climate Change Research, 2021, **17**(4): 388-399.
- [39] 何峰, 刘峥延, 邢有凯, 等. 中国水泥行业节能减排措施的协同控制效应评估研究[J]. 气候变化研究进展, 2021, **17**(4): 400-409.
- He F, Liu Z Y, Xing Y K, *et al.* Co-control effect evaluation of the energy saving and emission reduction measures in Chinese cement industry [J]. Climate Change Research, 2021, **17**(4): 400-409.
- [40] 刘树洋, 周灵君, 姜伟立, 等. 基于案例分析的大气污染物与温室气体协同减排效应研究[J]. 污染防治技术, 2022, **35**(2): 3-8.
- Liu S Y, Zhou L J, Jiang W L, *et al.* Analysis of synergistic emission reduction effect of air pollutants and greenhouse gases based on cast analysis [J]. Pollution Control Technology, 2022, **35**(2): 3-8.
- [41] 蒋春来, 宋晓晖, 钟悦之, 等. 2010~2015年我国水泥工业NO_x排放清单及排放特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(11): 4841-4848.
- Jiang C L, Song X H, Zhong Y Z, *et al.* Emissions inventory and characteristics of NO_x from cement industry [J]. Environmental Science, 2018, **39**(11): 4841-4848.
- [42] 沈叶, 刘中侠, 邓翠翠, 等. 工业部门低碳化驱动因素与脱钩路径分析——以安徽省为例[J]. 长江流域资源与环境, 2022, **31**(12): 2597-2607.
- Shen Y, Liu Z X, Deng C C, *et al.* Analysis of driving factors and decoupling path of low-carbonization on industrial sector: a case study of Anhui Province [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, **31**(12): 2597-2607.
- [43] Shen J L, Zhang Q, Xu L S, *et al.* Future CO₂ emission trends and radical decarbonization path of iron and steel industry in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, **326**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129354.
- [44] Liu D D. Convergence of energy carbon emission efficiency: evidence from manufacturing sub-sectors in China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, **29**(21): 31133-31147.
- [45] 李少林, 王齐齐. “大气十条”政策的节能降碳效果评估与创新中介效应[J]. 环境科学, 2023, **44**(4): 1985-1997.
- Li S L, Wang Q Q. Evaluation of energy saving and carbon reduction effect of air pollution prevention and control action plan and innovation intermediary effect [J]. Environmental Science, 2023, **44**(4): 1985-1997.
- [46] 刘茂辉, 刘胜楠, 李婧, 等. 天津市减污降碳协同效应评估与预测[J]. 中国环境科学, 2022, **42**(8): 3940-3949.
- Liu M H, Liu S N, Li J, *et al.* Evaluation and prediction of the synergistic effect of pollution reduction and carbon reduction in Tianjin [J]. China Environmental Science, 2022, **42**(8): 3940-3949.
- [47] 俞珊, 张双, 张增杰, 等. 北京市减污降碳协同控制情景模拟和效应评估[J]. 环境科学, 2023, **44**(4): 1998-2008.
- Yu S, Zhang S, Zhang Z J, *et al.* Scenario simulation and effects assessment of co-control on pollution and carbon emission reduction in Beijing [J]. Environmental Science, 2023, **44**(4): 1998-2008.
- [48] 中华人民共和国生态环境部. 中华人民共和国环境保护税法(2018年修正) [EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/ywzg/fgbz/fl/201811/t20181114_673632.shtml, 2018-11-14.
- [49] 北京市统计局, 国家统计局北京调查总队. 北京统计年鉴(2014~2021) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2014-2021.
- [50] 中华人民共和国生态环境部. 关于发布《排放源统计调查产排污核算方法和系数手册》的公告 [EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202106/t20210618_839512.html, 2021-06-11.
- [51] 北京市规划和国土资源管理委员会. 北京城市总体规划(2016年—2035年) [EB/OL]. http://www.beijing.gov.cn/gongkai/guihua/wngn/cqgh/201907/t20190701_100008.html, 2017-09-29.
- [52] Song C Z, Yin G W, Lu Z L, *et al.* Industrial ecological efficiency of cities in the Yellow River Basin in the background of China's economic transformation: spatial-temporal characteristics and influencing factors [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, **29**(3): 4334-4349.

CONTENTS

Spatio-temporal Evolution, Dynamic Transition, and Convergence Trend of Urban Carbon Emission Intensity in China	YANG Qing-ke, WANG Lei, ZHU Gao-li, <i>et al.</i> (1869)
Spatio-temporal Evolution and Trend Prediction of Transport Carbon Emission Efficiency	ZHENG Yan, JIANG Xue-mei, XIAO Yu-jie (1879)
Research on Carbon Emission Decoupling Factors Based on STIRPAT Model and LMDI Decomposition	ZHANG Jiang-yan (1888)
Carbon Peak Pathways of Industrial Parks Based on the LEAP Model: A Case Study of a National Development Zone in Nanjing	LI Hui-peng, LI Li, YIN Yin, <i>et al.</i> (1898)
Accounting and Analysis of Carbon Emissions in Universities: A Case Study of Beijing A University	CAO Rui, FENG Li, ZHANG Li-qiu (1907)
Synergy Effects and Driving Factors of Pollution and Carbon Emission Reduction in Manufacturing Industry in Beijing	YU Shan, HAN Yu-hua, MU Jie, <i>et al.</i> (1917)
Carbon Emissions Trading Prices and Total Factor Productivity: Evidence from China	WU Xue-ping (1926)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and PM ₁₀ in Chinese Cities	LI Jiang-su, DUAN Liang-rong, ZHANG Tian-jiao (1938)
Spatial-temporal Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and Ozone in the Border Area of Jiangsu, Anhui, Shangdong, and Henan from 2017 to 2021	CHEN Wei, XU Xue-zhe, LIU Wen-qing (1950)
Analysis of the Characteristics and Causes of PM _{2.5} and O ₃ Pollution in Xi'an During the Epidemic Lockdown Period	YUAN Xiao-hong, ZHANG Qiang, LI Qi, <i>et al.</i> (1963)
PM _{2.5} Chemical Composition and Spatial Variability in the Five Cities of Southern Jiangsu During Fall and Winter	FENG Wei, DING Feng, SHANG Yue, <i>et al.</i> (1975)
Source Apportionment of Fine Particles in Xianning, Hubei	LUO Yi, ZHU Kuan-guang, CHEN Pu-long, <i>et al.</i> (1983)
Spillover Benefits of Ammonia Emission Reduction in Xingtai Area to the Improvement of Atmospheric PM _{2.5} Concentration in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	BIAN Ze-jun, WEN Chao-yu, LANG Jian-lei, <i>et al.</i> (1994)
Characteristics, Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM _{2.5} During Winter in Liaocheng City	ZHANG Jing-qiao, ZHU Yao, CAO Ting, <i>et al.</i> (2003)
Composition Characteristics of Typical VOCs Sources in the Highland City of Lhasa	GUO Shu-zheng, YE Chun-xiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (2011)
VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment in Typical Industrial Parks in Beijing: Environmental Impact of High and New Technology Industries	WANG Jie, YAO Zhen, WANG Min-yan, <i>et al.</i> (2019)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in the Chengdu Plain Under the Influence of High Temperature Extremes	LEI Li-juan, ZHANG Yi, LUO Yi-na, <i>et al.</i> (2028)
Presence, Behavior, and Risk of Antiviral Drugs in the Aqueous Environment	GE Lin-ke, LI Xuan-yan, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (2039)
Spatio-temporal Variation and Probability Health Risk of Heavy Metals in Surface Water of Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River	WANG Liang, DENG Xue-jiao, WANG Xiao-lei, <i>et al.</i> (2054)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Strontium Enrichment of the Duoqu River Basin in Eastern Xizang	LI Jing-jie, LIAN Sheng, WANG Ming-guo, <i>et al.</i> (2067)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Its Moisture Sources in the Inland Regions of Northwest China	ZHANG Yan-yan, XIN Cun-lin, GUO Xiao-yan, <i>et al.</i> (2080)
Recharge Source and Evolution Process of Karst Groundwater in Tai'an Urban Area Based on Hydrochemistry and Hydrogen and Oxygen Isotopes	MENG Ling-hua (2096)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors of Surface Water and Groundwater in the Mountainous Area of Danjiang River Basin	ZHANG Zi-yan, FU Yong-peng, WANG Ning-tao, <i>et al.</i> (2107)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Yuanyangchi Irrigation Area, Jinta Basin	WANG Xiao-yan, HAN Shuang-bao, ZHANG Meng-nan, <i>et al.</i> (2118)
Hydrochemical Characteristics and Health Risk Assessment of Shallow Groundwater in the Plain Zone of Deyang City	LIU Nan, CHEN Meng, GAO Dong-dong, <i>et al.</i> (2129)
Spatial and Temporal Distribution of Microplastics in the Sediments of Typical Urban River Network	XU Wan-lu, FAN Yi-fan, QIAN Xin (2142)
Construction of Nitrogen Emission Inventory at Sub-basin Scale and Analysis of Key Sources in Fuxian Lake Watershed	WANG Yan-jie, LIANG Qi-bin, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (2150)
Preparation of Lanthanum Crosslinked Calcium Peroxide/Sepiolite/Sodium Alginate Composite Hydrogels and Their Elimination Performance for Endogenous Phosphorus	QU Si-tong, SHAN Su-jie, WANG Chong-ming, <i>et al.</i> (2160)
Formation Mechanism, Structural Characteristics of Ultrafine Mineral Particles, and Their Environmental Effects	LIU Zhen-hai, ZHANG Zhan-hua, YUAN Yu-xin, <i>et al.</i> (2171)
Research Progress in Application of Biochar-immobilized Bacteria Composites in Environmental Remediation	SUN Shu-yu, HUANG Meng-xin, KONG Qiang, <i>et al.</i> (2185)
Effect of Microplastics on Ammonia Nitrogen Adsorption by Zeolite in Water and Its Mechanism	LIAN Jian-jun, XIE Shi-ting, WU Pei, <i>et al.</i> (2195)
Mechanism of Ultraviolet Aging Effect on the Adsorption of Ciprofloxacin by Nano-biochar	MA Feng-feng, XUE Zhi-yi, ZHAO Bao-wei (2203)
Response of Phytoplankton Communities and Environmental Factors Under the Influence of Land Use in the Wuding River Basin	GUO Shan-song, HU En, DING Yi-tong, <i>et al.</i> (2211)
Bacterial Community Diversity and Functional Gene Abundance of Culturable Bacteria in the Wetland of Poyang Lake	YU Jiang, WANG Chun, LONG Yong, <i>et al.</i> (2223)
Bacterial Community Structure and Its Relationship with Heavy Metals in Sediments of Diannong River	LIU Shuang-yu, MENG Jun-jie, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i> (2233)
Impacts of Treated Wastewater on Bacterial and Fungal Microbial Communities in Receiving Rivers	GUO You-shun, YU Zhong, HAO Wen-bin, <i>et al.</i> (2246)
Metagenomics Reveals the Characteristics and Functions of Bacterial Community in the Advanced Wastewater Treatment Process	HU Jian-shuang, WANG Yan, ZHOU Zheng, <i>et al.</i> (2259)
Spatio-temporal Characteristics of Habitat Quality and Natural-human Driven Mechanism in Dabie Mountain Area	ZHENG Ya-ping, ZHANG Jun-hua, TIAN Hui-wen, <i>et al.</i> (2268)
Hyperspectral Inversion of Soil Organic Matter Content Based on Continuous Wavelet Transform, SHAP, and XGBoost	YE Miao, ZHU Lin, LIU Xu-dong, <i>et al.</i> (2280)
Effects of Straw Retention, Film Mulching, and Nitrogen Input on Soil Quality in Dryland Wheat Field	YE Zi-zhuang, WANG Song-yan, LU Xiao, <i>et al.</i> (2292)
Effects of Long-term Application of Organic Fertilizer on the Occurrence and Migration Characteristics of Soil Microplastics	WANG Chang-yuan, MA Xiao-chi, GUO De-jie, <i>et al.</i> (2304)
Effect of Different Soil Salinities on N ₂ O Emission: A Meta-analysis	HUANG Yi-hua, SHE Dong-li, SHI Zhen-qi, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Prediction of Carbon Storage Based on Land Use/Land Cover Dynamics in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	ZHENG Hui-ling, ZHENG Hui-feng (2321)
Simulation of Temporal and Spatial Changes in Ecosystem Carbon Storage in Funiu Mountains Based on InVEST Model	ZHANG Zhe, SHI Zhen-qin, ZHU Wen-bo, <i>et al.</i> (2332)
Relationship Between Microbial Nutrient Limitation and Soil Organic Carbon Fraction During Shelterbelts Construction	XU Feng-jing, HUANG Yi-mei, HUANG Qian, <i>et al.</i> (2342)
Characteristics and Driving Forces of Organic Carbon Mineralization in Brown Soil with Long-term Straw Returning	ZHAO Yu-hang, YIN Hao-kai, HU Xue-chun, <i>et al.</i> (2353)
Effects of Winter Green Manure Mulching on Soil Aggregates, Organic Carbon, and AMF Diversity	LU Ze-rang, CHEN Jia-yu, LI Zhi-xian, <i>et al.</i> (2363)
Spatial and Temporal Distribution of Nitrogen in the Liaohe River Basin and Its Responses to Land Use and Rainfall	ZHOU Bo, LI Xiao-guang, TONG Si-chen, <i>et al.</i> (2373)
Nitrous Oxide Emissions from Ponds in Typical Agricultural Catchment with Intensive Agricultural Activity	ZHANG Xin-yue, XIAO Qi-tao, XIE Hui, <i>et al.</i> (2385)
Effects of Biochar Combined with Different Types of Nitrogen Fertilizers on Denitrification Bacteria Community in Vegetable Soil	LIU Xiao-wan, LIU Xing-ren, GAO Shang-jie, <i>et al.</i> (2394)
Investigation of Soil Microbial Characteristics During Stand Development in <i>Pinus tabulaeformis</i> Forest in Taiyue Mountain	MA Yi-shu, CAO Ya-xin, NIU Min, <i>et al.</i> (2406)
Simulation of Heavy Metal Content in Soil Based on Sparse Sample Sites	ZHANG Jia-qi, PAN Yu-chun, GAO Shi-chen, <i>et al.</i> (2417)
Identification Priority Source of Heavy Metal Pollution in Greenspace Soils Based on Source-specific Ecological and Human Health Risk Analysis in the Yellow River Custom Tourist Line of Lanzhou	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (2428)
Heavy Metal Accumulation and Assessment of Potential Ecological Risk Caused by Soil pH Changes in Different Types of Purple Soils in Southwest China	ZHANG Hai-lin, ZHANG Yu, WANG Ding, <i>et al.</i> (2440)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Arable Land Around an Iron Ore Mining Area in Chongqing	LIAO Ze-yuan, LI Jie-qin, SHEN Zhi-jie, <i>et al.</i> (2450)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around Metal Mines	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (2461)
Effect of Red Mud-based Nano Zero-valent Iron on Remediation of Polymetallic Contaminated Soil	LIU Long-yu, YANG Shi-li, ZHAO Huang-shi-yu, <i>et al.</i> (2474)
Effects of Zinc Application on Cadmium Accumulation in Alkaline Soil-Wheat Seeding Systems	ZHANG Yao, WANG Tian-qi, NIU Shuo, <i>et al.</i> (2480)